

2003, том 39, № 2

УДК 620.1.08 : 778.38

**С. А. Бабин, Е. В. Васильев, В. И. Ковалевский, Е. Ф. Пен,
А. И. Плеханов, В. В. Шелковников**

(Новосибирск)

**МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ТЕСТИРОВАНИЯ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Представлены новые устройства записи и тестирования пропускающих и отражательных голограмм на фотополимерных материалах, позволяющие исследовать динамику их дифракционной эффективности, спектральные, шумовые и другие характеристики.

1. Голографические фотополимерные материалы. Голография является областью фундаментальных научных исследований и высокодоходных практических приложений. Возможности голографии во многом определяются свойствами используемой регистрирующей среды, в качестве которой долгие годы использовались фотографические галогидосеребряные эмульсии. В настоящее время все большую популярность приобретают голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) [1, 2], не требующие мокрой обработки и позволяющие получать высокоэффективные объемные фазовые голограммы. ГФПМ представляют собой многокомпонентную смесь органических веществ, нанесенную в виде аморфной пленки толщиной 10–100 мкм на стеклянную, пластиковую или пленочную подложку. Регистрирующий слой содержит полимерный носитель, фотополимеризующиеся мономеры, систему фотоинициирования, пластификаторы, поверхностно-активные вещества и ряд других ингредиентов. Наличие в нем красителя-сенситизатора обеспечивает чувствительность материала в области излучения записывающего лазера. В результате химической реакции, инициированной воздействием света, происходит полимеризация мономеров, приводящая к локальному изменению показателя преломления в облученных участках слоя. При записи голограммы распределение света задано в виде интерференционной картины. Концентрация красителя и исходного мономера в облученных участках уменьшается, а концентрация полимера растет, таким образом возникает градиент концентраций, обуславливающий диффузию по-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-03-33336, № 02-03-33345).

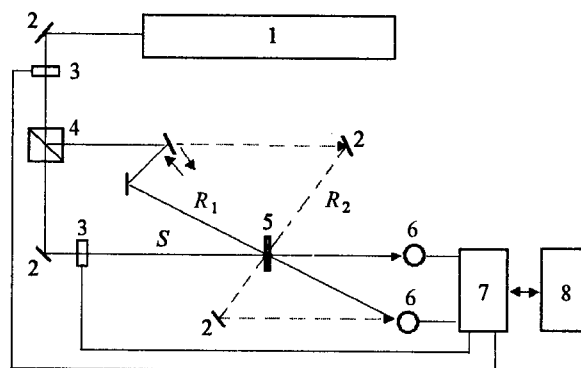


Рис. 1. Схема компьютеризированного стенда для исследования голографической чувствительности

движных молекул красителя и мономера. В пучностях интерференционной картины вследствие геля-эффекта реакция полимеризации проходит наиболее эффективно. В результате образуется объемная фазовая дифракционная решетка (голограмма). Различают пропускающие и отражательные голограммы, которые используются в изобразительной голографии, устройствах трехмерной оптической памяти, спектральных приборах, при защите товаров от подделки.

2. Стенд для исследования голографической чувствительности. Регистрирующие материалы характеризуются голографической чувствительностью – зависимостью дифракционной эффективности (ДЭ) от энергии экспозиции. На практике часто ограничиваются зависимостью ДЭ от времени экспозиции при фиксированной мощности. Для проведения подобных измерений разработан компьютеризированный стенд, схема которого приведена на рис. 1, где изображены He–Ne-лазер типа ЛГН 207А ($\lambda = 633$ нм, мощность 1,5 мВт) 1; зеркала 2; фотозатворы 3; светоделительный кубик 4; записывающий предметный S и опорные R_1, R_2 пучки (для пропускающего и отражательного типов голограммы); образец с фотополимерным материалом 5; фотоприемники для измерения интенсивностей дифрагированного и прошедшего пучков 6; электронный блок управления режимами работы стенда 7; персональный компьютер 8; стрелками показаны положения переключателя направления опорного пучка для записи пропускающего или отражательного типов голограмм. Стенд размещается на жесткой несущей металлической плите размерами $75 \times 50 \times 5$ см.

Устройство управления стендом 7 работает в ручном режиме и от ЭВМ. В последнем случае экспозиция фотополимерного материала происходит в импульсном режиме. В течение длительности импульса экспозиции t_e оба фотозатвора открыты, затем сигнальный затвор закрывается, а общий затвор остается открытым на короткое время (< 50 мс), за которое измеряются интенсивности дифрагированного и прошедшего опорного пучков. Затем общий затвор также закрывается. После каждого импульса происходит считывание данных с фотоэлектрических преобразователей. Дифракционная эффективность вычисляется по формуле

$$\eta = U_S / (U_S + U_R),$$

где U_S и U_R – напряжения на выходе сигнального и опорного фотодатчиков соответственно.

Этот процесс повторяется с периодом T до тех пор, пока не истечет ранее заданное общее время экспозиции.

Обмен информацией между стендом и управляющим компьютером осуществляется через последовательный порт ввода-вывода.

Программное обеспечение, выполненное в виде приложения Windows, позволяет легко варьировать параметры экспозиции, отображать результаты измерений на экране в виде графиков, а также сохранять результаты эксперимента в файле для документирования и последующей математической обработки.

Кроме научных исследований стенд может быть также использован в учебном процессе при демонстрации принципов голографии и свойств голографических фотополимерных материалов.

С его помощью выполнены исследования особенностей записи голограмм на фотополимерных материалах, в частности, выявлены эффекты оптического и темнового усиления [3], а также оптимизирован химический состав ГФПМ.

На рис. 2 представлен типичный вид зависимости дифракционной эффективности η одиночной пропускающей голограммы, полученной на ГФПМ, от времени экспозиции (при суммарной интенсивности записывающих пучков около 40 мВт/см^2).

Видно, что вначале имеет место так называемый индукционный период ($\eta = 0$), обусловленный инерционностью процесса фотополимеризации, затем в течение 1–5 с наблюдается быстрый рост ДЭ до величины порядка 50 %, а далее этот рост замедляется и наступает насыщение при $\eta = 60$ %. В данном случае пороговая энергия записи, соответствующая $\eta = 1$ %, составляет 40 мДж/см^2 , а полная энергия записи, при которой достигается максимум ДЭ, не превышает 250 мДж/см^2 на длине волны излучения 633 нм. Путем анализа такого рода характеристик проведен подбор концентраций компонент композиции, в результате чего повышена ее чувствительность и снижен уровень шумов рассеяния [4].

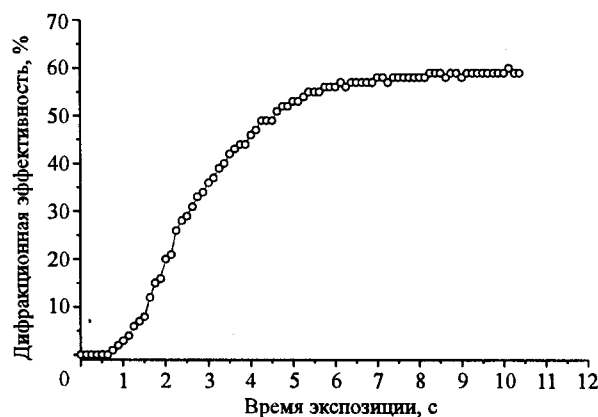


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности голограммы от времени экспозиции

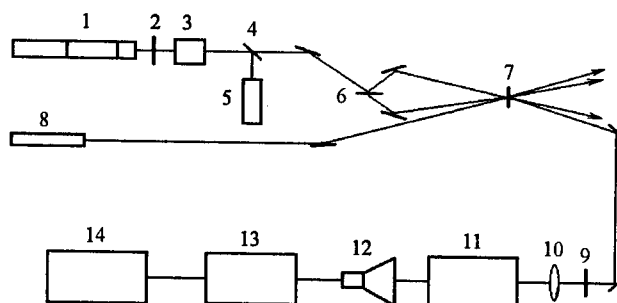


Рис. 3. Схема экспериментальной установки импульсной лазерной записи пропускающих голографических решеток в фотополимерном материале: 1 – импульсный Nd : YAG-лазер ($\lambda = 532$ нм), 2 – инфракрасный фильтр, 3 – затвор, 4 – стеклянная пластина, 5 – импульсный фотометр ФПМ-02, 6 – полупрозрачное зеркало, 7 – образец ГФПМ, 8 – непрерывный He-Ne-лазер ($\lambda = 633$ нм), 9 – неселективный фильтр, 10 – линза, 11 – спектрограф СТЭ-1, 12 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-79), 13 – цифровой осциллограф (С9-8), 14 – компьютер

3. Исследования динамики импульсной записи голограмм. Для выяснения фундаментальных основ механизма голографической записи в фотополимерных материалах большой интерес представляет исследование динамики импульсной записи [5]. С этой целью разработан экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 3.

Запись голограмм проводилась с помощью твердотельного Nd : YAG-лазера, работающего в режиме модуляции добротности с внрезонаторным преобразованием частоты во вторую гармонику при импульсной накачке. Модуляция добротности осуществлялась четвертьволновым электрооптическим затвором, изготовленным из кристалла дейтерированного дигидрофосфата калия (DKDP), что дает возможность получить мощные импульсы длительностью ~ 10 нс. Преобразование частоты во вторую гармонику осуществлялось кристаллом дигидроарсенида цезия (CDA).

Импульсы повторялись с частотой 6,25 Гц. Для выделения одного импульса из непрерывной последовательности использовался затвор 3.

He-Ne-лазер применен для мониторинга дифракционной эффективности. Спектрограф использовался для очистки полезного сигнала He-Ne-лазера от шумов, вносимых излучением Nd : YAG-лазера, фоновой засветкой и люминесценцией образца. Очищенный таким образом пучок регистрировался ФЭУ, преобразовывался в электрический сигнал и подавался на цифровой осциллограф, позволявший анализировать и запоминать сигналы с разрешением 50 нс/точку. Осциллограф запускался по команде от фотометра. Данные с запоминающего цифрового осциллографа считывались в компьютер.

Для вывода кинетических уравнений записи голограмм в ГФПМ в импульсном режиме использовались несколько модельных схем описания процесса гибели активных радикалов при фотополимеризации. Не прибегая к математическим выражениям, для этих схем приведем экспериментальные данные роста ДЭ голограммы в сопоставлении с теоретическим описанием (рис. 4).

Из полученных данных четко видно, что наиболее точно кривые роста дифракционной эффективности описываются моделью, учитывающей гибель радикалов за счет рекомбинации. Проведенные исследования показыва-

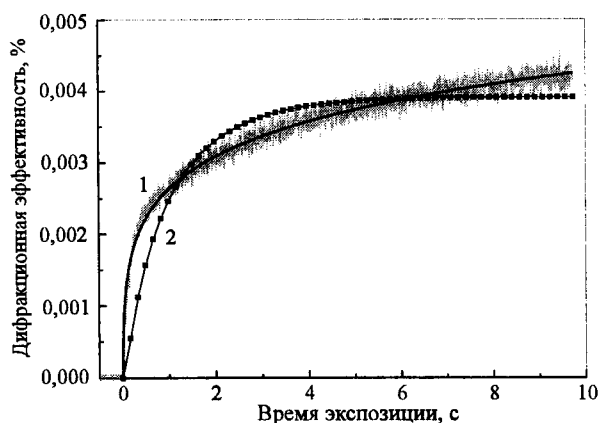


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных данных с помощью моделей, учитывающих рекомбинацию (кривая 1) и гибель радикалов на примесях (кривая 2)

ют применимость импульсного метода для проверки адекватности моделей записи голограмм в ГФПМ.

4. Стенд для исследования свойств объемных пропускающих и отражательных голограмм. Для проведения экспериментальных исследований свойств объемных пропускающих и отражательных голограмм (угловой селективности, режимов записи наложенных голограмм с угловым кодированием опорного пучка, влияния усадки толщины регистрирующего слоя) разработан компьютеризированный стенд, схема которого показана на рис. 5 [6], где представлены He-Ne-лазер, вращающийся столик типа 8MR180-2 фирмы «Altechna» (Литва) с шаговым приводом (минимальный шаг $0,01^\circ$, диапазон $0-360^\circ$), фотоприемник, модуль управления шаговым двигателем SMD3N, 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь ADC12, интерфейсная шина, персональный компьютер и дисплей с окном пользователя (экспериментатора).

Стенд построен по модульному принципу, т. е. его конфигурация собрана из стандартных управляющих и измерительных модулей «Microflex» [7], объединенных общей шиной и интерфейсом RS485. Программная оболочка

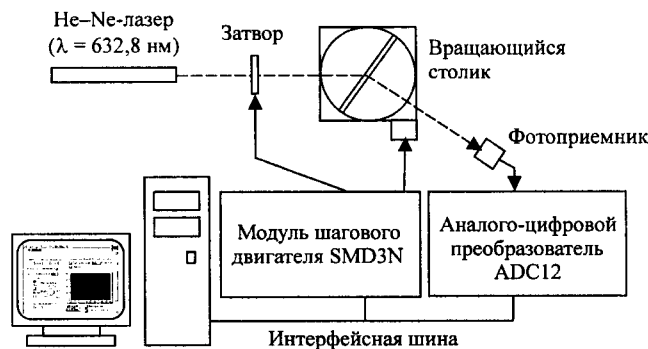


Рис. 5. Схема стенда исследования свойств объемных пропускающих и отражательных голограмм

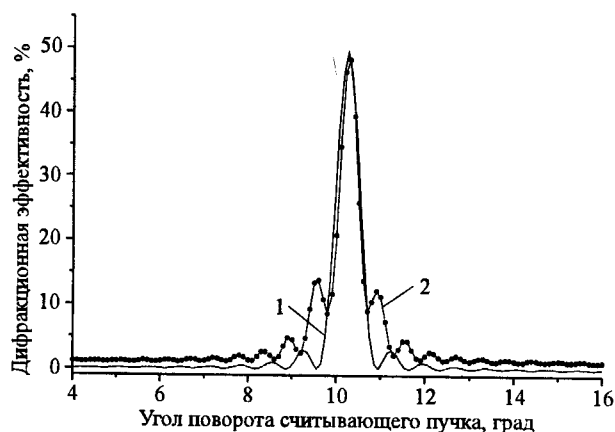


Рис. 6. Вид характеристики угловой селективности объемной пропускающей голограммы: кривая 1 – расчетная зависимость (модуляция $m = 0,002$, $\lambda = 632,8$ нм, угол записи 10°); 2 – экспериментальные данные

построена на основе пакета “LabVIEW” и позволяет легко варьировать условия эксперимента: можно задать начальное положение, диапазон и шаг углового сканирования, выбрать энергию экспозиции, оперативно отобразить результат измерения на экране, а также сохранить результаты эксперимента в файле.

С помощью стенда получены экспериментальные данные угловой селективности объемных пропускающих голограмм, записанных на ГФПМ толщиной 100 мкм, изготовленных в Новосибирском институте органической химии СО РАН. Проведено сравнение экспериментальной и теоретической характеристик угловой селективности (рис. 6).

Видно, что ширина контура исследуемой характеристики на полувысоте от максимального значения дифракционной эффективности примерно одинакова для теоретического и экспериментального случаев, но картина совершенно иная в окрестности первого минимума, что можно объяснить одновременным формированием множества синфазных голограмм с несколько отличным периодом решетки из-за непрерывного увеличения среднего значения показателя преломления регистрирующей среды при ее экспонировании.

Исследование селективных свойств объемных голограмм можно проводить, вращая образец и измеряя интенсивности как дифрагированного, так и прошедшего пучков. Последний метод удобен для определения величины дифракционной эффективности отражательной голограммы в случае усадки толщины регистрирующего слоя.

На рис. 7 приведен пример использования данного метода для измерения дифракционной эффективности отражательной голограммы, сформированной предметным пучком, падающим по нормали к поверхности регистрирующей среды, и опорным пучком, направленным с обратной стороны под углом 56° . По мере вращения образца зондирующий пучок дважды испытывает дифракцию при приближении к углу Брэгга для опорного и восстановленного предметного пучков. На рис. 8 хорошо видно, что угловое расстояние между пучками сократилось с 56° до 26° по сравнению с конфигурацией пучков до записи голограммы. Этот эффект объясняется влиянием усадки толщины

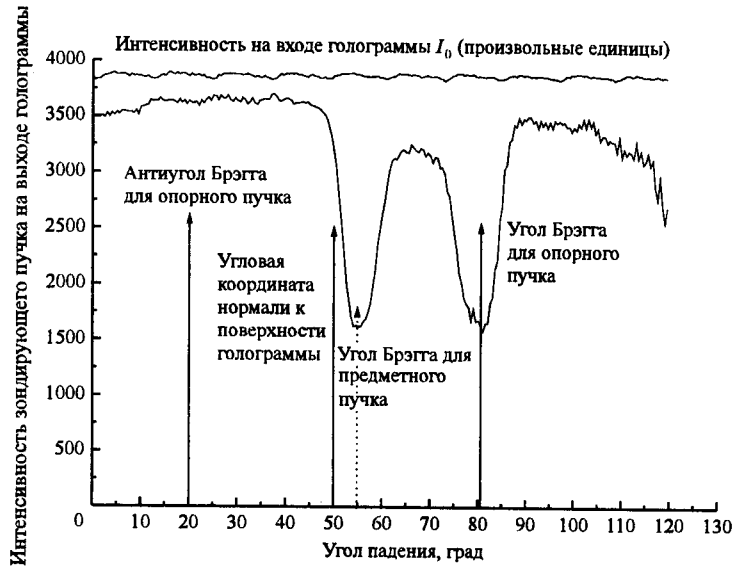


Рис. 7. Измерение дифракционной эффективности объемной отражательной голограммы

регистрирующего слоя. Непрерывное изменение углового положения опорного и восстановленного предметного пучков затрудняет измерение дифракционной эффективности отражательной голограммы с помощью стенда, описанного в разд. 2. Вместе с тем анализ интенсивности зондирующего пучка на выходе голограммы позволяет решить эту задачу.

Очевидно, что

$$I_0^{(1)} = I_0 - I_{\text{погл}} - I_{\text{отр}} - I_{\text{дифр}},$$

$$I_0^{(2)} = I_0 - I_{\text{погл}} - I_{\text{отр}},$$

где $I_0^{(1)}, I_0^{(2)}$ – интенсивности зондирующего пучка на выходе голограммы при двух значениях угла падения этого пучка: при угле Брэгга для опорного

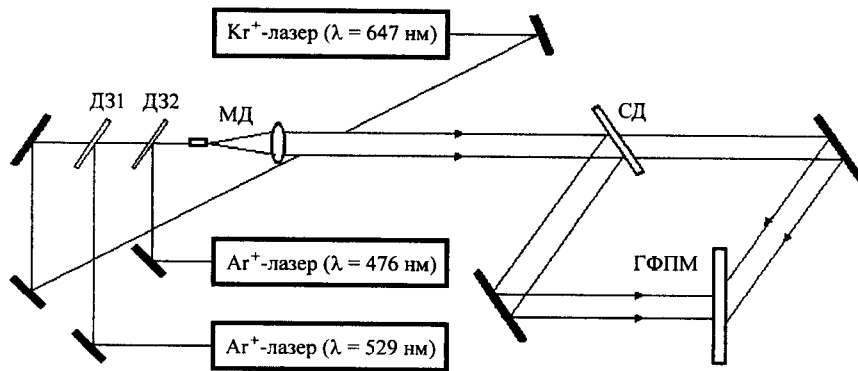


Рис. 8. Схема стенда тестирования цветных отражательных голограмм

пучка (1) и симметричном ему угле (2) относительно нормали к поверхности голограммы, а $I_{\text{погл}}$, $I_{\text{отр}}$, $I_{\text{дифр}}$ – интенсивности поглощенного, отраженного и дифрагированного пучков.

Тогда дифракционная эффективность

$$\eta = \frac{I_{\text{дифр}}}{I_0} = \frac{I_0^{(2)} - I_0^{(1)}}{I_0}.$$

В приведенном на рис. 7 случае $\eta = 52\%$.

5. Стенд для записи и тестирования цветных отражательных голограмм. С практической точки зрения наибольший интерес вызывают фотополимерные материалы, позволяющие записывать многоцветные голограммы. Для этих целей необходимы фотополимерные композиции, содержащие определенные красители, и лазеры, перекрывающие синий (440–480 нм) и зелено-красный (510–650 нм) спектральные диапазоны. Нами разработан стенд, обеспечивающий запись и тестирование цветных отражательных голограмм, схема которого приведена на рис. 8.

Основу стенда составляют Ag^+ - и Kг^+ -лазеры «Инверсия», модельный ряд которых включает лазеры мощностью до 70 Вт [8]. Лазер содержит излучатель, вакуумный блок и источник питания с выносным пультом управления. В качестве активного элемента излучателя используется широкоапертурная секционированная металлическая разрядная трубка с саморазогревающимся жидкометаллическим катодом [9].

Конструкция трубки неотпаянная, рабочий газ непрерывно прокачивается через трубку вакуумным насосом. Схема с продольным потоком газа имеет принципиальные преимущества: она позволяет получать продольно-однородный разряд практически при любых токах разряда и оптимизировать давление для конкретной линии генерации. Кроме того, в таком варианте вакуумной системы возможна работа с различными газами в одном лазере, в частности с аргоном и криптоном. Эффективная селекция основной поперечной моды в широкоапертурной трубке обеспечивается выпукло-вогнутым резонатором с увеличенным модовым объемом. Селекция одной частоты (продольной моды) выполняется термостабилизированным эталоном Фабри – Перо, в выпукло-вогнутом резонаторе селекция возможна вблизи нулевого порядка (без наклона) эталона с повышенной эффективностью [10]. Исходя из требований небольших габаритов и умеренного энергопотребления в конкретных лазерах голографического стенда используются разрядные трубки диаметром 5 мм и активной длиной 70 см, длина резонатора при этом составляет около 140 см. При токе разряда 80 А потребление не превышает 25 кВт. Мощность генерации такого лазера в многомодовом режиме составляет 15 Вт на сине-зеленых (457–529 нм) линиях аргона, 4 Вт на красных (647–676 нм) линиях криптона. После селекции линий призмой (или селективным зеркалом) мощность в режиме осевой TEM_{00} -моды составляет на отдельных линиях 0,5 (457 нм), 2,5 (514 нм), 0,5 (529 нм) и 1 Вт (647 нм). При внесении эталона для получения одночастотной генерации мощность на разных линиях варьируется в диапазоне 50–75 % от исходной. Отметим, что линия 529 нм, соответствующая запрещенному электронному переходу $4p^4D_{3/2} - 4s^2P_{1/2}$, имеет малый коэффициент усиления (4 % на проход в указанных условиях) и очень чувствительна к неоднородности разряда и потерям в резонаторе. Тем не менее за счет оптимизации разряда и конфигура-

ции резонатора с малыми потерями были получены достаточно высокие выходные параметры, что позволяет использовать эту зеленую линию в голографии наряду с традиционной линией 514 нм.

Комбинированная оптическая система обеспечивает объединение пучков Ag^+ - и Kr^+ -лазеров с помощью дихроичных зеркал (ДЗ1 и ДЗ2 на рис. 8) в один коллимированный и очищенный посредством микродиафрагмы (МД) пучок, который расщепляется светоделителем (СД) на предметный и опорный пучки, направляемые на образец ГФПМ.

Для исследования спектральных характеристик и дифракционной эффективности отражательных голограмм на одном образце обычно изготавливалась серия голограмм диаметром 1 см с различным временем экспозиции, которое варьировалось в диапазоне 0,5–100 с при плотности мощности излучения 1–10 мДж/см². Система фотозатворов позволяет регистрировать монохромные, а также двух- и трехцветные голограммы. В некоторых экспериментах изготавливались отражательные голограммы по методу Денисюка. В этом случае использовался лишь один записывающий пучок [11].

6. Метод тестирования спектральных характеристик отражательных голограмм. Характерной особенностью ГФПМ является возможность записи голограмм в реальном времени. В этом случае возникает необходимость и тестирования в реальном времени, что позволяет оптимизировать режимы и параметры записи голограмм. Особенно это актуально в случае отражательных голограмм. С учетом этого обстоятельства разработан метод мониторинга спектральных характеристик отражательных голограмм синхронно с процессом их записи [12].

На рис. 9 показана схема экспериментальной установки для тестирования отражательных голограмм, которая состоит из фотополимерного материала ГФПМ, предметного S и опорного R записывающих пучков, а также зондирующего пучка белого света от галогенной лампы и компьютеризированного спектрофотометра.

Спектрофотометр обеспечивает запись серии спектров пропускания исследуемой голограммы в течение протяженного промежутка времени (от единиц секунд до нескольких минут) с интервалом 25–100 мс. Интенсивность зондирующего излучения должна быть столь малой, чтобы не влиять на запись голограммы и в то же время обеспечивать достаточный световой сигнал для спектрофотометра. Направление распространения зондирующего пучка подбирается таким образом, чтобы избежать прямого попадания какого-либо из записывающих пучков во входную апертуру спектрофотометра и вместе с тем сохранить условие Брэгга (идентичность углов падения

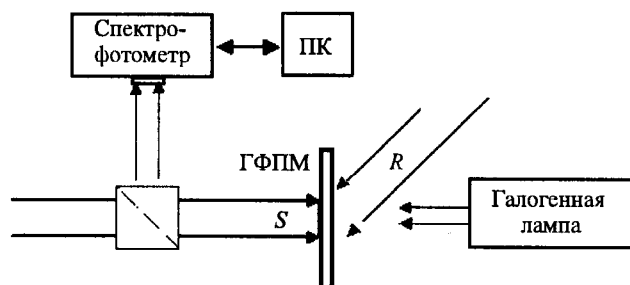


Рис. 9. Схема стенда тестирования спектральных характеристик отражательных голограмм

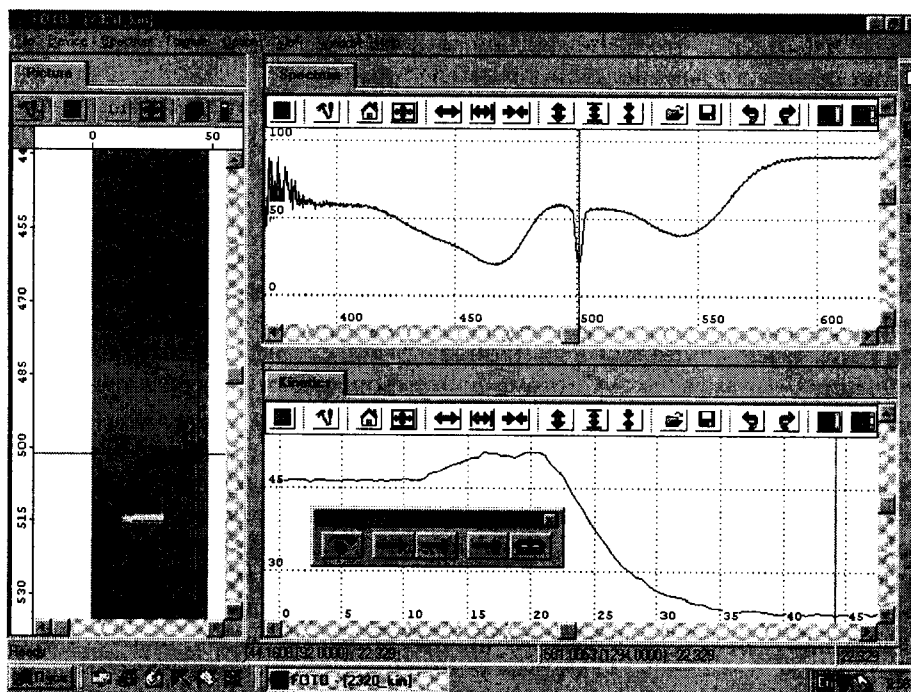


Рис. 10. Типичное экранное окно по исследованию динамики спектра отражательной голограммы

записывающего и зондирующего пучков). Компьютерная обработка полученных спектров позволяет проследить динамику как спектра в целом, так и выделенной линии, а также построить трехмерную картину в координатах $T - \lambda - t$ (пропускание – длина волны – время).

Рис. 10 отображает разные процессы исследования динамики спектра отражательной голограммы. Окно "Picture" показывает общий вид процесса в координатах $T - \lambda - t$. Хорошо видны след дрейфа λ_{\max} в процессе записи голограммы в коротковолновую область спектра, а также отметка длины волны записи (514 нм) и длительность экспозиции. Окно "Spectrum" в данном случае отображает спектр пропускания отражательной голограммы сразу по окончании экспозиции. Видно, что провал в спектре пропускания, составляющий примерно 20 % и означающий факт записи отражательной голограммы, смещен относительно длины волны записи примерно на 13 нм. Окно "Kinetics" показывает изменение пропускания исследуемой голограммы на длине волны 501 нм в процессе экспозиции.

Эксперименты проводились со спектрофотометром «Колибри» («ВМК-Оптоэлектроника», Новосибирск), построенным на базе многоэлементных линеек фотоприемников.

При фотополимеризации из-за конверсии вещества (превращения мономера в полимер) возникает усадка толщины регистрирующего слоя, приводящая к деформации структуры голографической решетки и вследствие этого к изменению спектральных характеристик отражательной голограммы.

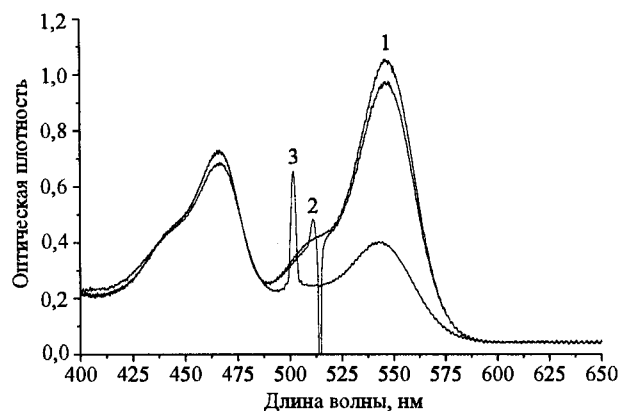


Рис. 11. Временные срезы динамики спектра пропускания отражательной голограммы

На рис. 11 изображены временные срезы динамики спектра пропускания отражательной голограммы, полученной на экспериментальном образце ГФПМ при записи излучением Ag^+ -лазера ($\lambda = 514$ нм, интенсивность 5 мВт/см²): спектр ГФПМ до экспозиции (видны максимумы поглощения, характерные для используемых в составе композиции красителей в сине-зеленой области спектра) (кривая 1); спектр пропускания отражательной голограммы после 2 с экспозиции (хорошо видны пик поглощения, означающий факт появления отражательной голограммы, и маркер в виде блика Ag^+ -лазера на длине волны 514 нм) (кривая 2); спектр после 8 с экспозиции (окончание записи) (кривая 3). На рис. 12 изображена трехмерная картина исследуемого процесса. Хорошо видны динамика смещения спектрального отклика, его уширение и степень изменения пропускания.

Данный метод позволяет также исследовать динамику записи многоцветных голограмм. На рис. 13 показана спектральная характеристика отражательной голограммы при одновременном экспонировании излучением двух лазеров Ag^+ ($\lambda = 529$ нм) и Ag^+ ($\lambda = 476$ нм): спектр поглощения ГФПМ до экспонирования (кривая 1), спектр голограммы сразу после экспонирования

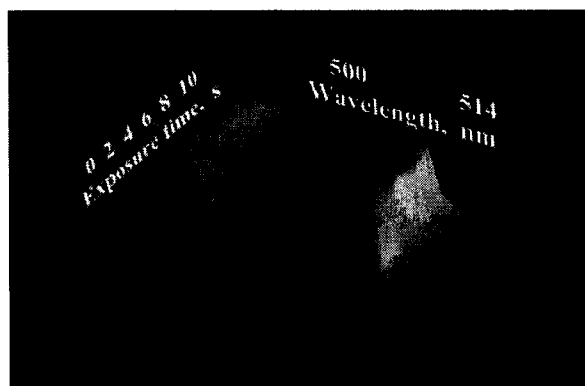


Рис. 12. Трехмерная картина динамики спектрального отклика отражательной голограммы

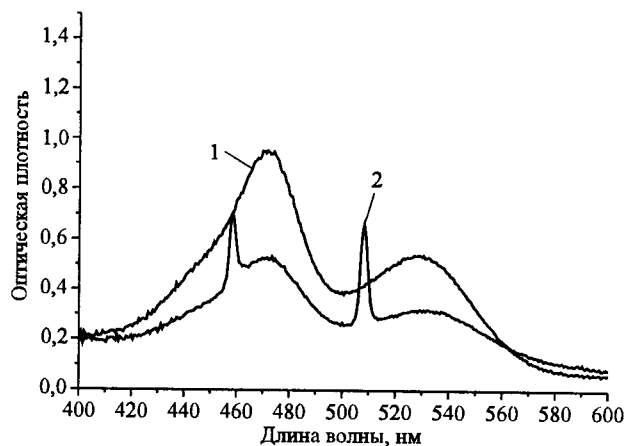


Рис. 13. Спектр отражательной голограммы при одновременном экспонировании излучением двух лазеров

ния (кривая 2). Хорошо видны два пика, означающие появление отражательных голограмм, соответствующих двум длинам волн записи (коротковолновый сдвиг спектрального отклика обусловлен усадкой толщины регистрирующего слоя, оценка величины которого приведена далее).

На рис. 14 изображена спектральная характеристика этой же голограммы после ее термообработки при температуре 100 °С в течение 10 мин. Видно, что в результате такой обработки коэффициент отражения обеих спектральных компонент значительно возрос и составил примерно 90 %, в то же время увеличился и коротковолновый сдвиг вследствие дальнейшей усадки толщины регистрирующего слоя.

Анализ полученных экспериментальных данных проводился путем сопоставления с теоретическими представлениями [13]. В частности, использовалась модель, описывающая объемную отражательную голограмму в виде структуры многослойных тонких пленок. Подгонкой расчетных пара-

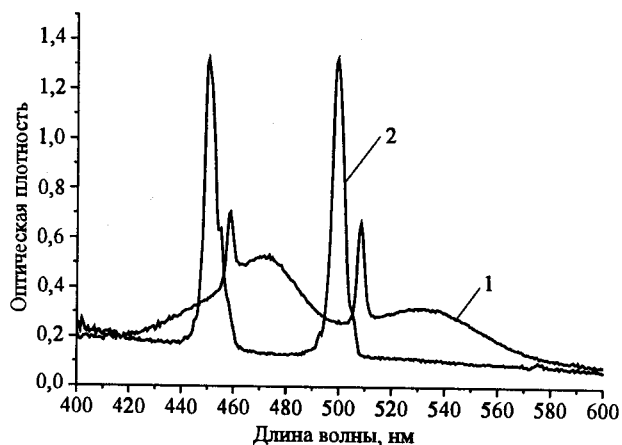


Рис. 14. Спектр голограммы (см. рис. 13) до обработки (кривая 1) и после (2)

метров такой структуры установлено, что физическая усадка, приводящая к коротковолновому сдвигу спектрального отклика отражательной голограммы, составляет 5 %, а увеличение среднего значения показателя преломления, дающее противоположный эффект, равно 0,015. При моделировании предполагается, что усадка происходит преимущественно в тех областях, откуда диффундировал мономер.

Заключение. Разработанные методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов позволили получить фундаментальную информацию о свойствах этих материалов.

1. Обнаружено наличие оптического усиления голограмм, заключающегося в увеличении дифракционной эффективности первичной решетки при ее постэкспозиции одним пучком.

2. Установлено, что в процессе динамической записи голограммы происходит непрерывное увеличение среднего значения показателя преломления регистрирующей среды и, как следствие, постепенное изменение условий Брэгга, искажающее характер угловой селективности объемной пропускающей голограммы.

3. Выявлены три стадии формирования отражательных голограмм:

– зарождение голограммы, когда дифракционная эффективность и усадка малы;

– быстрый рост эффективности до величины 50 %, сопровождающийся большой усадкой, а следовательно, значительным смещением спектрального отклика;

– насыщение эффективности и стабилизации усадки.

Авторы выражают благодарность Т. Н. Герасимовой и П. Е. Твердохлебу за полезные обсуждения, а также Б. Н. Панкову, Н. Н. Вьюхиной, А. И. Ерышеву, А. В. Константиновой, Н. А. Коркиной, П. А. Чубакову за помощь в разработке описанных устройств и приготовлении экспериментальных образцов ГФПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gambogi W. J., Weber A. M., Trout T. J. Advances and applications of DuPont holographic photopolymers // SPIE. 1994. 2043. P. 2.
2. Berezhnaya V. N., Gerasimova T. N., Konstantinova A. V. et al. Holographic photopolymer material containing tertiary polymer amines // Optical Memory and Neural Networks. 1996. 5, N.1. P. 11.
3. Pen E. F., Sinyukov A. M., Shelkovnikov V. V. et al. Optical amplification in the photopolymer material // SPIE. 1993. 1806. P. 140.
4. Герасимова Т. Н., Жаркова Г. М., Пен Е. Ф. и др. Исследование характеристик шума рассеяния голографических фотополимерных материалов // Оптический журнал. 2002. 69, № 10. С. 49.
5. Shelkovnikov V. V., Plekhanov A. I., Pen E. F., Sharangovich S. N. Dynamics of holographic diffraction gratings formation in pilot photopolymer materials at pulse recording // SPIE. 1997. 3347. P. 27.
6. Litvintsev V., Pen E., Slobodchikov L., Shelkovnikov V. Automation of researches of holographic photosensitive materials by the "Microflex" modular distributed SCADA system // Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control, and Information Technology". Calgary: ACTA Press, 2002. P. 79.

7. <http://microflex.iae.nsk.su/>
8. **Babin S. A., Goldort V. G., Krasnikov Yu. I. et al.** Pump laser for dye amplifier in artificial laser guide star system of telescope with adaptive optics // SPIE. 2002. **4644**. P. 374: <http://inversion.iae.nsk.su/>
9. **Донин В. И.** Мощные ионные газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1991.
10. **Бабин С. А., Хорев С. В.** Селекция продольных мод лазера без наклона внутрирезонаторного эталона Фабри – Перо // Квантовая электроника. 1999. **27**, № 1. С. 42.
11. **Sazonov Yu. A., Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Gerasimova T. N.** Photopolymer material for recording reflection holograms by He-Ne and Kr⁺ lasers // SPIE. 2000. **4149**. P. 100.
12. **Pen E. F., Shelkovnikov V. V., Goulanian E. H. et al.** The method for the research of the dynamics of the spectral characteristics of the reflection holograms in photopolymer materials // SPIE. 2002. **4900**. P. 957.
13. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю., Шелковников В. В.** Моделирование спектральных характеристик отражательных голограмм в фотополимерных материалах // Изв. вузов. Сер. Физика. 2001. **44**, № 10. С. 60.

*Институт автоматизации и электротехники СО РАН,
Новосибирский институт органической
химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,
E-mail: pen@I23.iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
23 января 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!